

조력발전소의 수차발전기 및 수문도수로 방출수를 이용한 해류발전

장경수*, 이정은**

Ocean Current Power Generation using sea water discharged from Turbine Generator and Gate Channel of Tidal Power Plant

Kyungsoo Jang*, Jungeun Lee**

Key Words : Tidal Power System(조력발전시스템), Ocean Current Power Generation(해류발전), Turbine Generator(수차발전기), Ocean Energy Convert(해양에너지 변환)

Abstract

This paper is about the ocean current power generation using sea water incoming into the lake surrounded by barrages and sea water discharged from a dam made of artificial structures. In operation of a tidal power plant, the sea water discharged from a turbine structure and a gate structure of a tidal power plant is faster than the tidal current caused by tides in nature and has better characteristics than that to run ocean current turbines.

It is shown that the sea water discharged after generating electricity through a turbine generator of a tidal power plant and the sea water discharged from a gate structure of a tidal dam still have kinetic energy high enough to run an ocean current turbine and produce valuable electricity.

1. 서론

2008년 1월 초 국제유가가 배럴당 \$100를 넘어섬으로써 초고유가 시대의 도래를 알렸다. 국제유가는 1998년 10달러 안팎에서 2007년 초반의 60달러에 이어 1년 만에 10배나 올랐다. 이는 중국, 인도 등 신흥 경제대국들이 급부상하면서 소요되는 석유 소비를 공급이 따라가지 못하고 있기 때문이다. 이처럼 에너지 수급불안이 갈수록 심해지고 있고 지구온난화 방지를 위한 기후 변화협약의 채택 및 온실가스 배출 억제 등의 국제적 환경규제가 강화됨에 따라 이에 대한 적절한 대응책 마련은 이제 국가 미래를 좌우하는 중대한 문제가 되고 있다. 따라서 이에 능동적으로 대처하고 지속발전 가능한 미래를 위해, 에너지 사용의 효율화와 더불어 신·재생에너지의 개발 및 활용과 관련된 기술개발에 총력을 기울이고 있는 것이 전 세계적 추세이다.

해양에너지는 아직까지 개발이 본격화되지 않은 지구상의 마지막 에너지 자원중의 하나로써, 무한한 잠재적 가치를 가지고 있다. 해양에너지 중에서 조력, 조류력, 파력 등은 조석현상에 의해 발생하며, 해류발전 또는 조류발전은 대개 조석에 의해 구동되고 해저지형에 의해 증폭되는 해수의 운동에너지를 이용하여 발전하는 방식을 말한다. 이들 에너지 자원의 잠재성은 대단하지만 경제성 있는 개발을 하기에는 대부분의 해양지역에서의 에너지밀도가 너무 작아 상용화 개발은 제한적으로 이루어지고 있다.

해외의 조력발전소 건설현황을 살펴보면, 세계에서 첫 번째로 건설된 조력발전소는 1960년부터 1966년까지 6년간에 걸쳐 프랑스 La Rance에 건설되었으며, 시설용량은 240MW이다. 1968년 백해에 있는 구소련의 Kislaya Guba에 세워진 조력발전소는 0.4MW의 시설용량이다. 북미에서 첫 번째이자 마지막으로 건설된 조력발전소는 캐나다의 Annapolis 국립발전소로서 1984년 Fundy만의 입구에 건설되었으며, 시설용량은 20MW이다. 중국은 여러 개의 작은 조력발전소를 건설하였으며, 큰 것으로는 1985년 건설된 것으로 시설용량 3,200kW의 Jiangxia 조력발전소가 있다[1,2].

Table 1. Tidal power plants in foreign countries[2]

구분	랑스 (프랑스)	애나폴리스 (캐나다)	지양시아 (중국)	키스라야구바 (러시아)
최대조차	13.5m	8.7m	8.39m	3.9m
시설용량	240MW	20MW	3.2MW	0.4MW
준공연도	1966	1984	1985	1968
연간발전량	544GWh	50GWh	6.0GWh	1.2GWh
발전방식	복류식 (양수)	단류식 (낙조식)	복류식	복류식
전경사진				

이러한 조력발전소는 해양생태계 및 주위환경에 미치는 영향이 지대하고, 방조제 등의 건설비용이 막대하여 경제성이 문제가 되므로, 해외에서는 더 이상 조력발전소가 설득력을 잃어가고 있는 실정이다[3].

* (주)삼안 해양에너지TFT, ksjang@samaneng.com

** Blue Ocean Power, blueoceanpower@hanmail.net

한편, 국내 사정은 이와 달리 조력발전소 건설바람이 불고 있다. 조력발전소 건설 현황을 보면, '시화호 조력발전소'가 2009년 말 준공목표로 건설 중이며, '가로림 조력발전소'는 환경영향평가 및 기본설계를 마치고 실시설계를 목전에 두고 있으며, '인천만 조력발전소'는 기술적 경제적 타당성 조사를 마친 단계이고, 이외에도 아산만, 천수만, 새만금 등에서도 대규모 조력발전소 건설이 검토되고 있다[4].

Table 2. Tidal power plants in Korea[2]

구 분	시화호	가로림	인천만	강 화
대 조 차	7.80m	6.81m	7.20m	7.70m
조지면적	39km ²	96.0km ²	128km ²	82.5km ²
방 조 제	12.67Km	1.32Km	15.09Km	7.32km
발전방식	창조식	낙조식	낙조식	낙조식
시설용량	25.4MW 25.4MW× 10기	520MW 26.0MW× 20기	720MW 20.0MW× 36기	812.8MW 25.4MW× 32기
연간발전량	552.7GWh	950GWh	1,396GWh	1,536GWh
사업비	3,551억원	10,022억원	25,000억원	25,000억원
추진현황	공사중	실시설계	타당성	예비타당성



우리나라에서의 조류발전[5~8]은 한국해양연구원을 중심으로, 국내 조류발전 최대 가능성 지역으로 선정된 진도와 해남사이의 울돌목에서 2001년부터 실용화 기술개발연구가 수행되었으며, 2005년에는 진도의 울돌목 해저에 실험용 조류발전설비(50kW)를 설치하여 타당성 및 경제성 조사를 실시하였으며, 2007년에는 상용화 실증시험을 위해 1MW급 조류발전 설비를 설치하고, 이 결과를 바탕으로 한국동서발전(주)에서는 2010년까지 총 2천억원을 투입하여 90MW급 상용 조류발전단지를 건설할 계획이었다. 하지만 바지선이 진도대교의 교각에 부딪치는 사고가 발생하여, 지자체로부터 조류발전 설치예정지의 이전을 요구받는 상황이 발생하여 향후 조류발전단지의 상용화 계획이 영향을 받게 되었다.

조류가 조석에 의해 발생하는 자연적인 해수의 흐름이라면, 해류는 인공구조물에 의하여 발생하는 해수의 흐름이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 조력발전소에서 방출되는 해류를 이용하여 수차발전기를 구동하여 발전하는 해류발전에 관한 것으로, 해양이 가지고 있는 에너지를 조력발전으로 아무리 많이 추출한다고 하여도 발전 후 방출하는 해수에는 여전히 많은 에너지를 포함하고 있음을 간단한 이론과 시화호 조력발전소에 대한 수치해석 보고서의 결과를 분석·비교하여 증명하였다.

2. 조류발전

일반적으로 조류 발전을 위해서는 조류의 평균유속이 4knots (1m/s ≅ 3knots) 이상인 곳을 경제성 있는 후보지로 거론되며, 상용 조류발전소의 건설은 대개 조류속도가 2.0m/s 이상인 곳을 대상으로 이루어지고 있다. 미국, 캐나다, 영국을 중심으로 조류 발전에 대한 상용화 프로젝트가 진행중이지만 본격적인 대규모 상용발전은 세계적으로도 드문 실정이다. 이는 조류발전이 가능할 정도로 빠른 해수의 흐름이 나타나는 자연적인 해역이 세계적으로 아주 제한되어 수차발전기를 설치할 적합한 장소를 찾기가 쉽지 않았기 때문이다. 뿐만 아니라 조류의 평균속도가 만족스럽다 하더라도 조류발전소가 설치되는 지역의 해저지형 조건에 따라 조류의 속도분포가 불균일하고, 조류의 흐름 방향이 일정하지 못할 경우에는 수차발전기의 구조적 안전성 확보 및 신뢰성 있는 발전량 조절이 어려운 단점이 있다.

국내 조류발전 최대 가능성 지역으로 선정된 울돌목의 경우, 조류는 대조시 최대유속이 대략 4.0~4.5m/s이고, 수심평균치의 1개월 평균유속은 236cm/s이고, 해저바닥으로부터 14m에서 20m까지의 상부 7개 층에서의 평균유속은 아래층으로부터 262, 263, 261, 252, 233, 203, 186cm/s로 나타난 것으로 보고되었다[8].

2.1 조류발전 이론

조류에 의한 발전출력은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$P_w = 0.5\eta\rho A V^3 \quad (1)$$

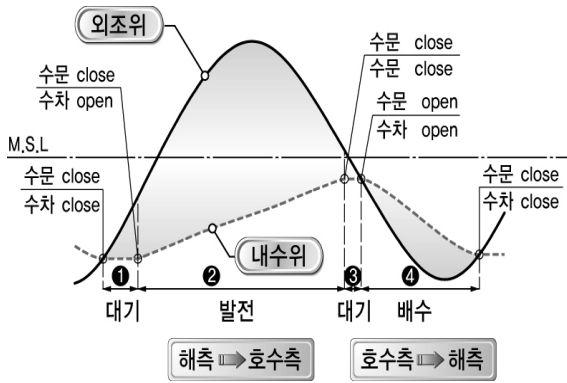
여기서,

- ρ : 해수밀도, kg/m³
- A : 통과단면적, m²
- V : 조류속도, m/s
- η : 터빈효율

조류에 의한 발전출력은 터빈의 효율과 조류의 통과단면적에 비례하고 조류속도의 3제곱에 비례하므로 조류의 유속이 큰 곳이 조류발전에 절대적으로 유리하다.

2.2 시화호 조력발전소

현재 우리나라 서해안 시화호에 건설되고 있는 시화호 조력발전소는 단류식 창조식 발전방식을 채택하고 있으며, 방조제를 기준으로 창조(밀물)시 발생하는 해측과 호수측의 해수 수위 차를 이용하여 조력발전소 수차발전기를 구동하여 발전한다. 이때 수문과 구배수갑문은 닫힌 상태에서 해수의 유입은 수차발전기를 통해서 일어난다. 해수의 유입은 호수의 범람을 막기 위해 호수의 관리수위까지만 허용되며, 호수의 수위가 관리수위에 도달하면 발전은 멈추고 수차발전기는 대기상태에 들어간다. 조수가 낙조(밀물)로 바뀌면서 해측 해수의 수면이 호수측의 관리수위보다 낮아질 때 수문과 구배수갑문을 열어 호수의 물을 해측으로 배출한다. 이때 대기상태의 수차발전기 로터 사이를 통해서도 일부 해수가 외해로 빠져나가며, 하루 12시간 24분 주기로 발전과 배수를 반복한다. Fig. 1에 단류식 창조식 조력발전소의 기본적인 운영 사이클의 일례를 나타내었다[2].



구분	모드	수 위 조 건
①	대기	• 최적 발전개시 수두차 발생시까지
②	발전	• 발전가능 최저수두차 발생시까지
③	대기	• 조지수위와 외해수위가 같은 시점까지
④	배수	• 조지수위와 외해수위가 같아지는 시점부터

Fig. 1 A basic cycle of a single current and inflow type tidal power plant

3. 조력발전소 방출수를 이용한 해류발전

3.1 조력발전소 수차발전기의 방출수를 이용한 해류발전

시화호 조력발전소의 창조시 조성범위는 0~7.5m이다. 낙차 6.0m인 경우, 해수가 갖는 위치에너지를 완전히 운동에너지로 변환할 때 해수가 얻을 수 있는 속도는 약 10.8m/s ($= \sqrt{2gh}$)이다.

한편, 시화호 조력발전소 건설공사 수차해석 및 수리모형실험 보고서[9]에 의하면 창조시 낙차 6.0m의 경우, 시화호 조력발전소의 수차발전기(1기당 시설용량 25.4MW)에 의해 조력에너지를 추출하고 난 뒤 수차발전기 방출구를 통해 호수로 방출되는 해류의 속도는 3.0m/s 이상인 것으로 보고되었다.

이는 세계적으로 유명한 영국 Pentland Firth[10]의 조류 평균속도가 1.5~2.2m/s인 것을 고려할 때 조력발전소 수차발전기의 후방으로 방출되는 해수의 흐름을 이용한 해류발전의 가능성이 매우 유망하다고 할 수 있다.

Fig. 2에 조력발전소 수차발전기의 후방에 해류발전기를 설치한 단면도를 나타내었으며, Fig. 3에는 수차발전기 후방에 해류발전기를 설치하고 호수측에서 수차발전기 후방을 바라본 그림이다.

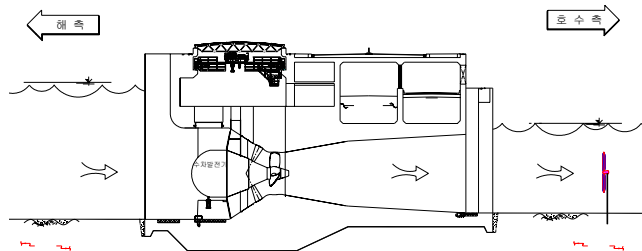


Fig. 2 Cross section of a turbine structure and a lake-side ocean current turbine generator

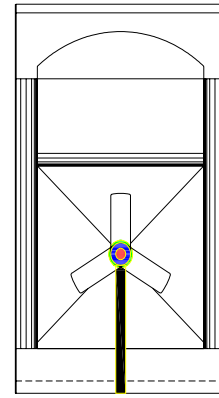


Fig. 3 Back view of a turbine structure and a lake-side ocean current turbine generator

3.2 조력발전소 수문도수로의 방출수를 이용한 해류발전

시화호 조력발전의 낙조시 조성범위는 0~2.0m로써, 낙차 2.0m의 경우, 수문도수로의 수문을 개방할 때 수문도수로를 통하여 호수측에서 해측으로 배출되는 해수의 속도는 약 6.26m/s이다.

한편, 시화호 조력발전소 건설공사 수차해석 및 수리모형실험 보고서[9]에 의하면, 수문을 통해 해측으로 배출되는 해수의 속도는 6.0m/s 이상인 것으로 보고되었으며, 이것은 앞에서 언급한 이론값과 거의 같은 결과로써 낙조시의 배출과정에 어떠한 장애물이나 또는 어떠한 에너지 변환장치를 거치지 않고 해수의 위치에너지가 완전히 운동에너지로 변환되기 때문이다.

조력발전소 수문구조물의 수문도수로를 통해 해측으로 배출되는 해수의 속도가 수차구조물의 수차발전기를 통해 호수측으로 방류되는 해수의 속도보다 거의 2배 정도 빠르다. 이것은 식 (1)에서처럼 해류에 의한 발전출력이 속도의 3제곱에 비례한다는 점을 감안할 때 수문도수로를 통해 해측으로 배출되는 해류의 개발 잠재성이 대단히 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에 조력발전소 수문구조물의 후방인 해측에 해류발전기를 설치한 단면도를 나타낸 것이며, Fig. 5에는 조력발전소 수문구조물의 후방에 해류발전기를 설치하여 해측에서 수문구조물의 후방을 바라본 그림이다.

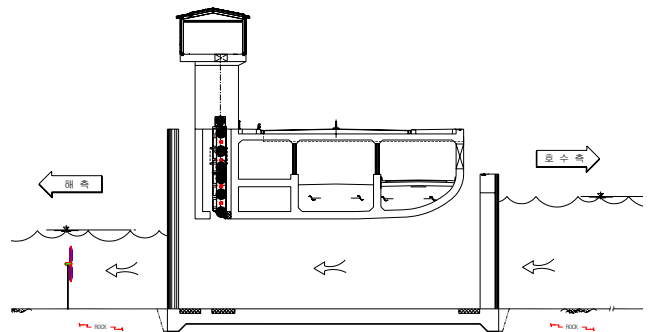


Fig. 4 Cross section of a Gate Structure and a sea-side ocean current turbine generator

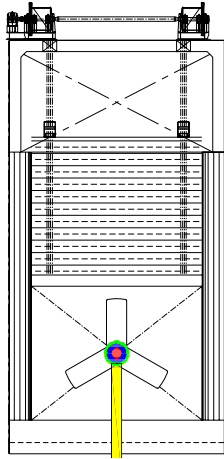


Fig. 5 Back view of a Gate Structure and a sea-side ocean current turbine generator

3.3 조력발전소 방출수를 이용한 해류발전의 전망

앞에서 보인 바와 같이 조력발전소 수차구조물과 수문구조물의 후방으로 방류되는 해류는 조석에 의해 발생하는 자연적인 조류가 갖는 속도보다 훨씬 높은 유속을 가지며, 해류 발전을 위한 유망한 천혜의 조건을 형성함을 보였다.

뿐만 아니라 조력발전소는 인공구조물로서 수차구조물 전·후의 해저지면과 수문구조물 전후의 해저지면을 평평하게 조성하거나 수차구조물과 수문구조물의 해수 유입구를 만곡부 등으로 만들어 수차발전기나 수문도수로를 통과하는 해류의 흐름을 인위적으로 유도할 수 있기 때문에, 해류가 갖는 평균유속, 해류 수차발전기로 접근하는 해류의 속도분포 및 해류의 흐름방향 등이 자연상태의 조류에서는 얻기 어려운 유용한 특성들을 가지고 있다.

따라서, 조력발전소 방출수를 이용하여 발전하는 해류발전은 해양에너지 개발에 새로운 장을 개척할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문은 조력발전소 수차발전기를 통하여 방출되는 해수와 수문도수로를 통하여 방류되는 해류의 흐름을 이용하여 발전하는 해류발전에 관한 것으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 조력발전소 수차구조물에 설치된 수차발전기를 통하여 발전한 뒤 호수측으로 방출되는 해수는 여전히 유용한 에너지를 포함하고 있다.

둘째, 조력발전소 수문구조물의 수문도수로를 통해 해측으로 배출되는 해수는 높은 속도를 가지고 있으며, 발전을 위한 유용

한 에너지를 포함하고 있다.

셋째, 상기의 방출되는 해수가 포함하고 있는 운동에너지는 해류발전기를 설치하여 유용한 전기에너지로 추출할 수 있다.

넷째, 조력발전소 수차구조물과 수문구조물을 통해 방출되는 해수는 조석에 의해 발생하는 자연적인 조류에서는 얻기 어려운 유용한 특성들을 가지고 있다.

후기

현재까지 국내에 건설된 풍력발전기의 총 발전용량이 191MW 정도임을 감안할 때 시화호 조력발전소의 발전시설용량 254MW는 풍력발전에 비해 조력발전의 규모가 참으로 대단함을 알게 한다. 국내에서는 정부와 신재생에너지 개발 보급에 관한 자발적 협약인 RPA(Renewable Portfolio Agreement)를 체결한 발전자회사를 중심으로 조력발전과 조류발전이 활발하게 추진되고 있다.

한국동서발전(주)는 2010년까지 총 2,000억원을 투입하여 울돌목에 90MW급 조류발전단지 건설계획을, 한국남동발전(주)는 2010년까지 500억원을 투입하여 경남 사천시 대방수도에 20MW급 상용 조류발전단지 건설계획을, 한국중부발전(주)는 2015년까지 전남 완도 해역에 총 9,000억원을 투입하여 300MW급 대형 조류발전단지를 건설할 계획을 발표하였다. 바라건대, 본 논문이 국가 미래에너지 확보에 일조할 수 있기를 기대해 본다.

참고문헌

- [1] 에너지관리공단, 신재생에너지 RD&D 전략 2030[해양], (2007).
- [2] 한국수자원공사, 시화호조력발전소 건설공사 실시설계보고서, (2005).
- [3] Francis Akwensivie, In the wake of marine current turbine, MS Thesis, University of Strathclyde, London, (2006).
- [4] 정중화, 김양근, 조력발전 기술현황 및 전망, 한국태양에너지학회지, 6권, 8호, (2007), pp. 3-8.
- [5] 조철희, 조류발전 특성과 국내외 기술개발 동향, 한국태양에너지학회지, 6권, 1호, (2007), pp. 9-16.
- [6] 조철희, 박관규, 국내외 해양 조류발전 기술, 한국신·재생에너지학회 2006년도 추계학술대회 논문집, (2006), pp. 134-137.
- [7] 이광수, 염기대, 박진순, 강석구, 박우선, 한상훈, 정공일, 박정우, 울돌목 조류에너지 개발 현황과 전망, 한국신·재생에너지학회 2005년도 추계학술대회 논문집, (2005), pp. 512-515.
- [8] 강석구, 염기대, 이광수, 박진순, 울돌목 조류발전의 연안물리적 관점에서의 고찰, Vol. 1, No. 2, (2005), pp. 73-78.
- [9] 한국수자원공사, 시화호 조력발전소 건설공사 수치해석 및 수리모형실험 보고서, (2004).
- [10] Tidal stream, www.tidalstream.co.uk